

岩质边坡楔形体破坏的离心模型试验方法研究

邢建营¹, 邢义川², 陈祖煜², 韩连兵², 梁建辉², 肖兆君²

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100044)

摘要: 叙述了岩质边坡楔形体破坏的离心模型试验, 较详细地介绍了试验中模型材料选择和试块加工的过程, 最后采用 Hook 方法和机动位移法对离心模型试验的结果进行了分析, 得到了预期的试验成果。

关键词: 岩质边坡; 楔形体破坏; 离心模型试验

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2005)03-0015-05

中图分类号: U416.14

Method Research of Centrifuge Modeling of Wedge Failure in Rocky Slope

XING Jian-ying¹, XING Yi-chuan², CHEN Zu-yu², HAN Lian-bing², LIANG Jian-hui², XIAO Zhao-jun²

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest University of Agriculture and Forestry, Yangling

District 712100, Shaanxi Province, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: The centrifuge modeling test of wedge failure in rock slope is presented. The processes of choosing materials and processing the samples are introduced. The results of centrifuge modeling test are analyzed by the two methods of slope stability, and the anticipative results are obtained at last.

Keywords: rocky slope; wedge failure; centrifuge modeling

在岩质边坡的稳定分析中, 楔形体破坏是岩质边坡失稳的一种典型形式, 由于其在工程的重要性而一直受到许多专家和学者的关注, 并相继提出了一些分析和处理方法。例如 1977 年 Hook 在《Rock Slope Engineering》一书中介绍了一个例子^[1], 方法如下。

假定楔形体滑动沿编号 5 的交线发生, 根据力极限平衡分析, 边坡的安全系数为:

$$F = \frac{3}{rH}(c_A X + c_B Y) + (A - \frac{r_w}{2r} X) \text{tg} \dot{i}_A + (B - \frac{r_w}{2r} Y) \text{tg} \dot{i}_B \quad (1)$$

式中: c_A, c_B ——面 A 和 B 的粘结力; \dot{i}_A, \dot{i}_B ——面 A 和面 B 的摩擦角; r ——岩石的密度; r_w ——水的密度; H ——楔形体的总高度; X, Y, A 和 B ——取决于楔体形状的无量纲系数(图 1)。

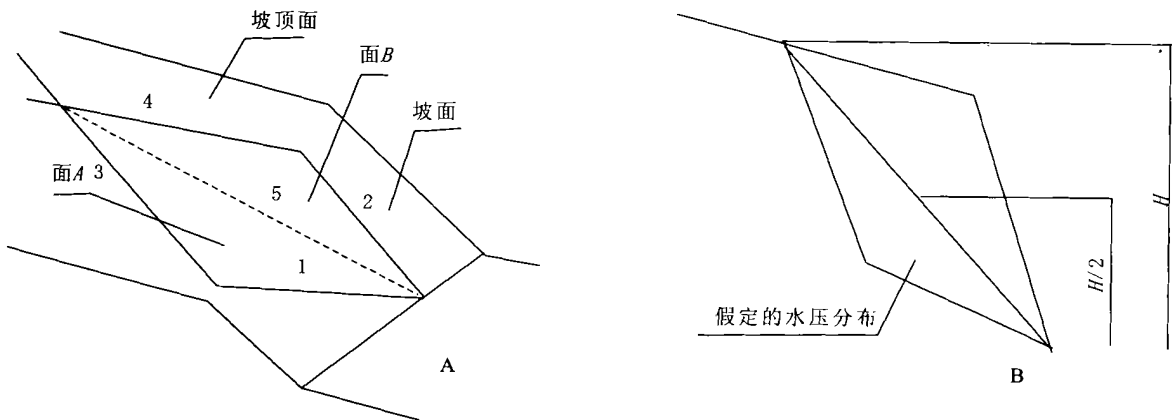


图 1 楔形体稳定分析用的几何要素

上述分析实际上是将平面滑坡的分析方法推广到 2 个滑面的楔形体滑坡, 即将滑坡体的重量分解为沿棱线方向的下滑力和 2 个垂直于滑面的法向力

N_1, N_2 , 并用法向力计算摩阻力。潘家铮在分析了几种典型实例后提出了著名的最大最小原理^[2], 并在该原理的基础上, 提出了空间滑坡分析的新的设想

和方法。基于这个设想和方法,陈祖煜等^[3]提出了边坡稳定分析的机动位移法,该方法假定一机动可能的位移场,滑坡体每一斜分条的变形速率方向都与滑面的切向成一特殊的角度 φ ,根据正交流动法则可知 φ 为滑面上的内摩擦角,这一位移方向和由滑面上的法向力和由它决定的摩擦力构成的合力方向正交,因此,这一合力在这一位移方向做功为零。这样滑面上的内能耗散的计算就变得非常简单,可以通过建立虚功方程,通过非线性迭代技术就可以得到隐含在强度指标中的安全系数值。当然,这一位移场必须满足位移协调条件和相应的位移边界条件。这样土坡稳定的机动位移法避开了滑面上复杂的力关系,可以通过一个简单的标量运算式的求解来得到安全系数。

如果将 Hook 方法称为传统的方法,机动位移法称为能量方法,那么潘家铮的最大最小原理是对传统方法的质疑,能量方法是对最大最小原理在楔形体破坏方面的证明。从理论上讲将滑坡看作能量的耗散,用塑性力学的方法去分析,更符合实际,要优于传统的极限平衡分析方法。为了验证这 2 种方法的优劣,更好地揭示楔形体破坏的规律性,在陈祖煜教授指导下开展了该课题的试验研究。

1 试验设备

1.1 离心机

离心机是本次试验的主要设备之一。试验采用中国水利水电科学研究院 LXJ-4-450 大型土工离心机进行,该设备的主要参数如下。(1)有效半径: 5.03 m; (2)最大加速度: 300 g; (3)最大容量: 450 g/t; (4)持续运行时间: 48 h; (5)数据传输方式: 基于局域网技术的无线传输方式。

1.2 角度可调式试验装置

角度可调式试验装置是专为本项试验设计加工的设备,该试验装置结构详见图 2。采用微型电机拖动,在额定的离心力场中可自动调节模型箱的倾斜角度。旋转模型箱上可安装各类传感器,测量模型的位移和倾角等参数。(1)模型箱内尺寸:长×宽×高=550 mm×275 mm×300 mm; (2)模型箱额定转动角度: $-10^{\circ} \sim 30^{\circ}$; (3)模型箱转动速度: 约 $1^{\circ}/\text{min}$; (4)允许离心加速度: $< 40g$ 。

1.3 测量仪表

(1)角度传感器。为了在试验的过程中,准确地量测模型箱的旋转角度,在模型箱上安装了一个角度传感器。这个角度传感器的名称为膜电位倾角传感器 FEC-60-1A,其生产厂家为北京市国科传感器研究开发中心。

(2)激光位移传感器。为了测定楔形体模型下滑状态,以判定模型下滑时的时间和角度,在旋转模型箱上安装无接触式激光位移传感器,在楔形体模型上安装一个自制的铁片作为激光位移传感器照准目标。传感器型号为 Wrenglor,量程为 40~100 mm,精度为 5~20 μm 。

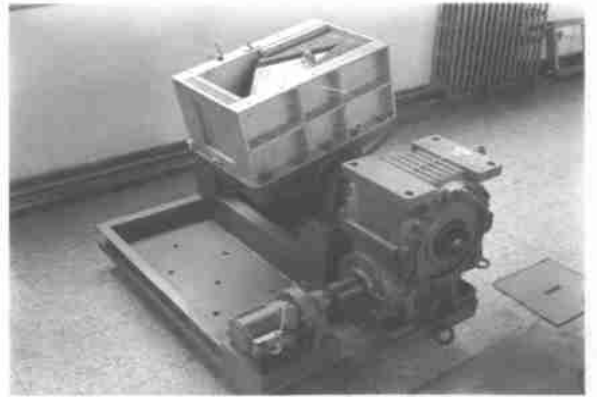


图 2 角度可调式试验装置

1.4 角度传感器率定仪器

(1)数据采集器为 VXI 总线系统,美国 Agilent 公司生产;

(2)光学合像水平仪,由山东维坊量具厂生产,规格 165 mm,精度 0.01 mm/m;

(3)A 型中心钻角度仪,成都量具集团公司生产,精度为 $1GE=5'$ 。

2 研究方法

为了达到试验的目的,在试验过程中必须遵循以下原则。

(1)滑动面的强度参数 c , φ 值可控,在试验过程中已知并为常数;

(2)在一定离心机转动加速度下,模型箱的角度变化不受影响,并可测;

(3)两结构面的粘聚力应尽量小,但最好不要等于零。其原因是当 $c=0$ 后,安全系数可能与边坡高度,坡面角以及坡顶面倾角,材料重度无关,离心模型试验就失去了意义,当 c 较大时 Hook 方法和机动位移法计算结果相近,达不到验证的目的。

根据上述原则,首先进行模型材料的选择试验,并在此基础上开展正式模型试验。

2.1 模型材料选择试验

2.1.1 试块加工 在模型材料选择试验中曾先后使用过混凝土、木材、石膏和有机合成材料。这些材料由于受加工和成形工艺影响较大,相应强度参数(粘聚力 c 和内摩擦角 φ) 在每次试验中都可能不同,予

以排除。后来考虑到钢材, 只要将其表面加工成相同的光洁度, 那么强度参数就是一样的, 比较有代表性。

可是由于钢材密度大, 试验过程中搬运不方便, 因此改用在木块上镶钢板的方法。每块试块的上面和下面各镶有 25 mm 厚的钢板, 中间为矩形木块, 试块尺寸依据模型箱的空间大小确定, 上试块和下试块外形尺寸一样, 均为 250 mm × 250 mm × 150 mm, 试块尺寸和形式见图 3。

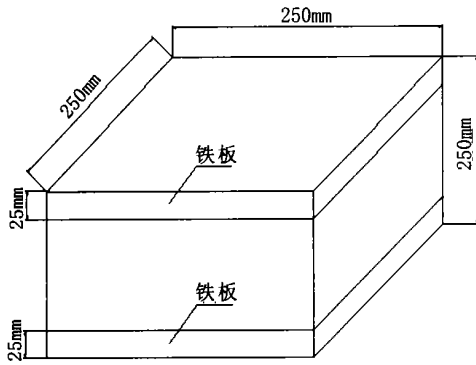


图 3 强度参数试验的试块形状和尺寸

为进行不同强度参数的试验比较, 试块的表面分别加工成不同的光洁度。下块面的光洁度为 $\gamma_{1.5}$, $\gamma_{2.5}$, 上块面的光洁度为 $\gamma_{1.0}$, $\gamma_{2.0}$, 上块重 27.0 kg, 下块重 26.8 kg。

2.1.2 模型材料选择 (1) 接触面为钢铁的试验重复性较好, 随试验条件的改变, 破坏时的倾角而不同, 但角度较小, 均在 11° 以下, 测得的滑面上强度参数太小, 不能很好验证 2 种分析方法的差异。(2) 试块接触面都贴砂纸的试验, 试验重复性同样较好, 随砂纸表面颗粒粗细的变化, 试块滑下角度随之不同, 但

角度较大。鉴于上述情况进行了砂纸与钢的接触面试验, 即在下试块贴上 $P_{180}^\#$ 的砂纸, 上试块仍采用光洁度为 $\gamma_{1.0}$ 钢板, 其它试验条件相同。试验结果为, 第 1 次 32.34° , 第 2 次 32.60° 。经比较分析这种方法较为理想, 一方面用它得到的强度参数较为合适, 另一方面由于楔形体模型在加工时, 上试块楔形体采用钢材, 下试块模型槽基座采用硬质塑料制成, 便于试验操作。

2.1.3 滑动面上的粘聚力和摩擦角 在试验中, 由以下公式可以求出不同材料的强度参数(粘聚力 c 和内摩擦角 φ):

$$\text{正压力: } N = W \times \cos\alpha \quad (2)$$

$$\text{滑动力: } S = W \times \sin\alpha \quad (3)$$

$$\text{正应力: } \sigma = N/A \quad (4)$$

$$\text{剪应力: } \tau = S/A \quad (5)$$

式中: W, α, A —— 分别为上试块重量、模型箱倾角、滑块接触面积。

在试验中进行了上试块采用在木块上镶光洁度为 $\gamma_{1.0}$ 钢板, 下试块分别贴 $P_{180}^\#$ 砂纸、 $P_{120}^\#$ 砂纸和 400 g/m^2 土工布的材料试验。每种材料试验进行了上试块分别为 27, 30, 33 kg 重量的 3 组, 每组试验又分别进行了离心加速度 0, 20, 30, 40 g 4 种工况, 当上试块滑动时, 测出模型箱的倾角 α 。将其与相应的试块重量代入式(2), (3), (4), (5), 计算出正应力和剪应力, 将每组正应力和剪应力点绘曲线并按直线拟合, 由公式: $\tau = C + \sigma \times \text{tg} \varphi$ 可求出每组粘聚力 C 和摩擦角 φ , 然后将这 3 组粘聚力和摩擦角值各自平均, 就是后来进行楔形体破坏分析时采用的强度参数值。另外, 还可以分别将每种材料的 τ, σ 全部数据拟合在一条曲线上, 可以得到相应强度参数值的线性回归值, 这些值稍有差别(表 1)。

表 1 强度试验结果

项目	上试块重/kg	分组试验成果		三组试验的平均值		线性回归	
		$C / (\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2})$	$\varphi / (^\circ)$	$C / (\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2})$	$\varphi / (^\circ)$	$C / (\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2})$	$\varphi / (^\circ)$
180# 砂纸	27	0.0005	27.856	0.0009	27.541	0.0012	27.524
	30	0.0017	27.026				
	33	0.0005	27.74				
120# 砂纸	27	0.0005	27.135	0.00043	26.997	0.0009	26.976
	30	0.0002	26.880				
	33	0.0006	26.976				
土工布	27	0.0059	17.739	0.0051	17.256	0.0072	17.124
	30	0.0057	17.129				
	33	0.0036	16.899				

3 楔形体破坏的离心模型试验

3.1 设计加工模型

根据模型箱尺寸,并用 Hook 方法和机动位移法验算,最后确定模型加工尺寸(图 4)。

根据楔形体滑面上强度参数的离心模型试验选定的模型材料和材料参数制作模型,其下部模型槽采用了聚氯乙烯塑料,两侧滑面对称,光洁度为 $\gamma 1.0$,上部的楔形体模型采用钢材,两侧的滑面光洁度均为 $\gamma 1.0$ 。

3.2 试验步骤

(1) 将加工的模型安装在模型箱内,同时将模型箱安装在离心机吊篮内;

(2) 按模型加模型箱重量在离心机的配重吊篮内进行配重;

(3) 试验前在下部模型槽两侧滑面上分别贴上所选的布类材料($P_{180}^{\#}$ 砂纸、 $P_{120}^{\#}$ 砂纸和 400 g/m^2 土工布),待表面干燥后,将楔形体轻轻地放在下部模型槽内,然后安装无接触式激光位移传感器和摄像系统;

(4) 开启离心机,将离心机的转速平稳上升,使模型的离心加速度达到预定加速度值,并在其稳定后转动模型箱,用无接触式激光位移传感器监视楔形体滑动情况,同时还用摄像系统配合监测,当测得位移突然增大,表明楔形体已经滑动,停止转动模型箱,再停止离心机运行,用角度传感器测量模型箱转角,同时用光学合像水平仪配合 A 型中心钻角度仪校核。图 5 为模型槽表面贴 $P_{120}^{\#}$ 砂纸的激光位移传感器监测资料。

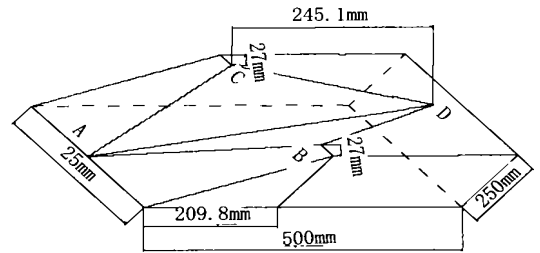


图 4 楔形体模型立体视图

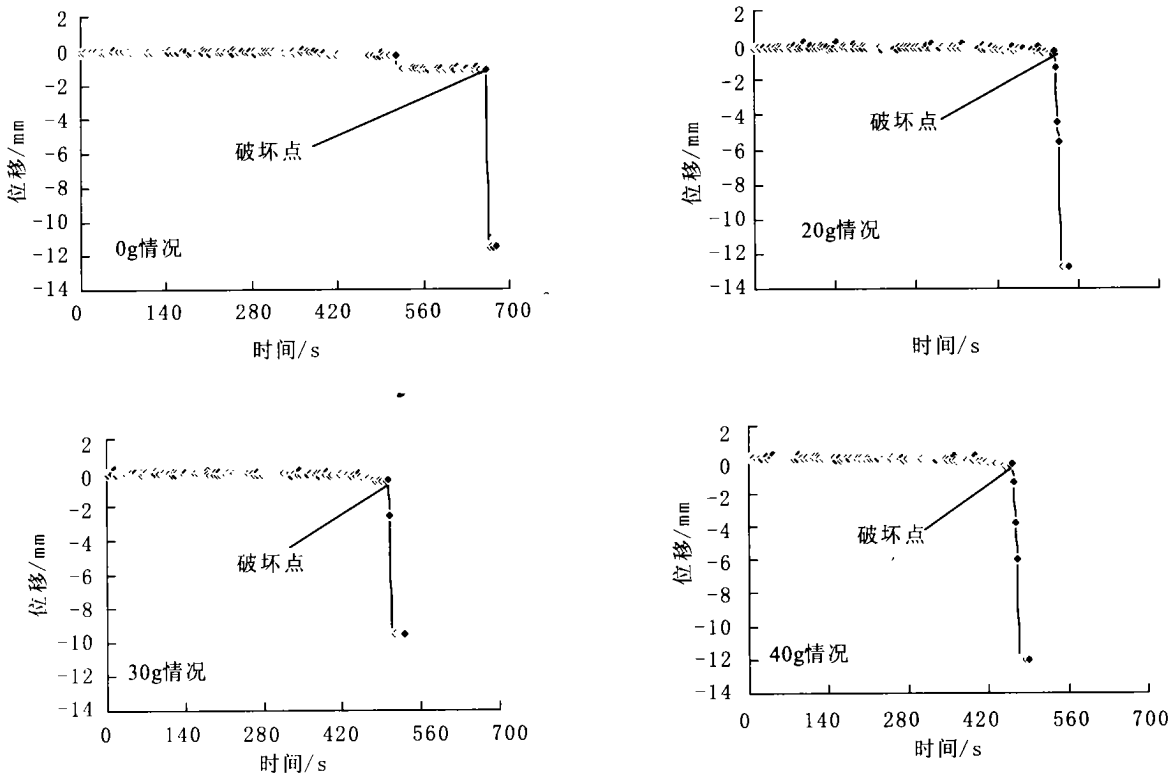


图 5 滑面贴 $P_{120}^{\#}$ 砂纸的离心模型试验激光位移传感器监测资料

3.3 试验成果分析

试验结果如表 2 所示。采用中国水利科学研究院陈祖煜教授提供的 Hook 方法和机动位移法分析

计算程序,将上述模型滑动时的角度以及对应的加速度值、强度指标、模型高度、水位等指标输入程序,分别得出相应的安全系数值,如表 3 所示。

表2 楔形体在不同离心加速度时的下滑角度

离心机加速度 a/g	0	20	30	40
楔形体滑下转角 α ($P_{180}^{\#}$ 砂纸)	18°	14°	13.78°	13°
楔形体滑下转角 α (土工布)	6.925°	- 0.05°	- 0.35°	- 0.183°
楔形体滑下转角 α ($P_{120}^{\#}$ 砂纸)	15.90°	12.65°	12.25°	11.3°

表3 Hook方法和机动位移法计算离心加速度结果对比

类型	0	20g	30g	40g
$P_{180}^{\#}$ 砂纸	0.833	0.884	0.890	0.914
	1.035	1.085	1.089	1.109
$P_{120}^{\#}$ 砂纸	0.837	0.905	0.917	0.948
	1.038	1.094	1.103	1.1295
土工布	1.122	0.914	0.916	0.905
	1.183	0.987	0.990	0.980

表中的 K_h 为 Hook 方法计算得到的安全系数值, K_n 为机动位移法计算得到的安全系数值。从表中可以看出, 这 2 种分析方法得出的安全系数值具有以下特点。

(1) 形槽表面贴 $P_{180}^{\#}$ 砂纸情况, Hook 方法的安全系数都小于 1, 属下限解; 机动位移法计算的安全系数 K_n 都大于 1, 属上限解。如果楔形体滑动时的临界状态安全系数为 1 的话, 随离心加速度的不同, Hook 方法的相对误差分别为 17.8%, 11.6%, 11%, 8.6%; 机动位移法的相对误差为 3.5%, 8.5%, 8.9%, 10.9%, Hook 方法的相对误差随离心加速度的增加而减小, 机动位移法的相对误差随离心加速度的增加而增大。

(2) 楔形槽表面贴 $P_{120}^{\#}$ 砂纸情况, Hook 方法的相对误差分别为 16.3%, 9.5%, 8.3%, 5.2%; 机动位移法的相对误差为 3.8%, 9.3%, 10.4%, 12.9%, 同表面贴 $P_{180}^{\#}$ 砂纸情况较一致。

(3) 楔形槽表面贴 400 g/m^2 土工布情况, Hook 方法的相对误差分别为 12.2%, 8.4%, 11%, 9.5%; 机动位移法的相对误差为 18.3%, 1.3%, 1%, 2%。

(4) 总体上看, 机动位移法的分析结果比 Hook 方法更符合试验情况。

4 结 论

(1) 选定的楔形体滑动面材料比较理想。楔形槽两侧滑面贴 $P_{180}^{\#}$ 砂纸, $P_{120}^{\#}$ 砂纸, 400 g/m^2 土工布与钢铁楔形体接触的强度参数 C, φ 值具有很好的稳定性。

(2) 从表 1 中强度参数 C, φ 值的整理来看, 分组整理后平均和整体拟合的结果基本相同, 说明强度参数不随试验离心加速度的变化而变化。

(3) 由于采用了角度可调式试验装置, 可以调节模型箱的倾角使模型在不同离心加速度下达到破坏, 便于对各种离心加速度下的破坏情况进行分析。

(4) 模型试验只是做了最简单的条件, 即对称情况, 两侧滑面强度参数相同。这样, 对机动位移法和 Hook 方法的验证, 差别不十分明显, 因为 Hook 方法的基本假设是楔形体滑动是沿两滑面交线发生, 而这种简单的实验条件与 Hook 方法假设相近。如果模型滑动面是非对称, 并且两滑面上强度参数不相等或者区域强度参数不相等的情况, 机动位移法能够比较好的适应各种情况。建议在有条件的情况下再做一些复杂情况的试验。

[参 考 文 献]

- [1] Hook E, Bray J W. 岩石边坡情况[M]. 冶金工业出版社, 1974.
- [2] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京: 水利出版社, 1980.
- [3] Chen Z Y, Wang Y J, Wang X G, Wang J. An upper bound wedge failure analysis method[J]. Proceedings of the International Symposium on Slope Stability Analysis. 1999(1): 325—328.